

CUPRINS

PREFAȚĂ	1
Despre autori.....	3
1. PREZENTARE GENERALĂ A INDUSTRIEI SOLARE	
FOTOVOLTAICE	5
1.1. Apariția resurselor de energie regenerabilă.....	5
1.2. Tehnologiile energiei solare	5
1.2.1. Tehnologia de încălzire și răcire solară	6
1.2.2. Tehnologia energiei solare concentrate	6
1.2.3. Tehnologie solară fotovoltaică (PV)	8
1.3. Avantaje, provocări și potențiale soluții	8
1.3.1. Avantaje	8
1.3.2. Provocări	10
1.3.3. Potențiale soluții	11
1.4. Tehnologie hibridă PV	11
1.4.1. Exemple de proiecte PV de energie solară concentrate	12
1.5. Evoluția istorică a instalației solare fotovoltaice	14
1.6. Dezvoltarea energiei solare fotovoltaice	17
1.7. Costul instalațiilor solare fotovoltaice	19
1.8. Eficiența energiei solare fotovoltaice	22
1.9. Abilitățile necesare pentru instalarea sistemelor solare fotovoltaice	23
1.9.1. Abilități de inginerie electrică	24
1.9.2. Abilități de inginerie mecanică, civilă și structural	25
1.9.3. Abilități electronice și de programare	25
1.9.4. Abilități economice	25
1.10. Concluzie	26
1.11. Exercițiu	26
Bibliografie	27
2. FABRICAREA CELULEI SOLARE	29
2.1. Prezentare generală a procesării semiconductoarelor	29
2.1.1. Conductoare	29
2.1.2. Izolatoare	29
2.1.3. Semiconductori	30
2.2. Siliciu dopat	30
2.3. Tipuri de siliciu dopat	31
2.3.1. Semiconductor de tip -n	31
2.3.2. Semiconductor de tip -p	32
2.4. Structura benzii de energie pentru semiconductori de tip n și p	33
2.5. Joncțiunea p-n	34
2.6. Prelucrare	36
2.7. Obținerea monocristalinului cilindric	40
2.8. Fabricarea celulelor	41
2.8.1. Texturarea suprafeței	42
2.8.2. Adăugarea stratului de tip -n	42
2.8.3. Serigrafia	43

2.9. Fabricarea și construcția modulelor fotovoltaice	46
2.9.1. Încapsularea	47
2.9.2. Stratul de sticlă și de fundal	48
2.9.3. Cadrul	49
2.9.4. Eticheta modulului fotovoltaic	49
2.10. Rezumatul etapelor de realizare a unui modul fotovoltaic	49
2.11. Densitatea de împachetare	52
2.12. Celule conectate în serie	53
2.13. Încălzirea hotspot (puncte fierbinți)	54
2.13.1. Cauzele hotspot-urilor	54
2.13.2. Efectele hotspot-urilor	56
2.14. Temperatura nominală de funcționare a celulei	56
2.15. Testarea și fiabilitatea dispozitivului	58
2.16. Moduri de degradare și eșec	62
2.17. Concluzie	63
2.18. Exercițiu	63
Bibliografie	64
3. PROPRIETĂȚILE ȘI DESIGN-UL CELULELOR SOLARE	65
3.1. Efectul luminii asupra celulelor solare	65
3.2. Schimbări la întuneric și iluminare	66
3.3. Circuitul ideal echivalent al unei celule solare	67
3.4. Curba I-V	67
3.4.1. Tensiunea în circuit deschis	69
3.4.2. Curentul de scurt-circuit	70
3.4.3. Punct de putere maximă	70
3.5. Curba P-V	71
3.6. Efectul temperaturii	72
3.6.1. Coeficientul de temperatură al tensiunii (%/°C)	72
3.6.2. Coeficientul de temperatură curentă (%/°C)	73
3.6.3. Coeficientul de temperatură al puterii (%/°C)	73
3.7. Efectul iradierii	75
3.8. Factorul de umplere	75
3.9. Rezistența	77
3.9.1. Rezistor în serie	77
3.9.2. Rezistor paralel	78
3.10. Concluzie	79
3.11. Exercițiu	79
Bibliografie	80
4. RESURSE SOLARE	81
4.1. Introducere	81
4.2. Soarele și radiațiile sale	81
4.3. Spectrul de radiații	81
4.4. Insolația globală	82
4.5. Radiații directe și difuze	83
4.6. Definiții pentru resursele solare	83
4.7. Efectele atmosferice	86
4.8. Echilibrul radiativ al Pământului	86
4.9. Indicele de masă a aerului	87

4.10. Constanta solară	89
4.11. Ora de vârf a soarelui (PSH)	89
4.12. Unghiurile solare	90
4.13. Traectoria Soarelui	93
4.14. Orientarea modului fotovoltaic	94
4.15. Efectul unghiului de înclinare și al orientării	96
4.16. Codul MATLAB pentru a determina valoarea iradiației solare totale	98
4.17. Evaluarea amplasamentului	101
4.18. Concluzie	102
4.19. Exercițiu	102
Bibliografie	103
5. COMPONENTELE SISTEMULUI SOLAR	104
5.1. Introducere	104
5.2. Module solare	104
5.2.1. Cutia de joncțiune și diodele de bypass	105
5.2.1.1. Adăugarea diodelor de bypass suprapuse	106
5.2.1.2. Adăugarea diodelor de bypass nesuprapuse	107
5.2.2. Terminale pentru modulul fotovoltaic	109
5.2.2.1. Conexiune în serie	109
5.2.2.2. Conexiune paralelă	110
5.2.3. Tipuri de module solare	110
5.2.3.1. Tehnologia celulară	110
5.2.3.2. Dimensiunea celulei	111
5.2.3.3. Module bifaciale	112
5.2.3.4. Numărul de bare colectoare	114
5.2.4. Problema de nepotrivire	114
5.3. Baterii	116
5.3.1. Baterii reîncărcabile comune	119
5.3.1.1. Baterii plumb-acid	119
5.3.1.2. Baterii avansate cu plumb-acid	120
5.3.1.3. Baterii pe bază de nichel	121
5.3.1.4. Baterii cu litium	122
5.3.2. Parametrii bateriei	125
5.3.2.1. Adâncimea de descărcare	125
5.3.2.2. Starea de încărcare	127
5.3.2.3. Rata de descărcare și rata de încărcare	128
5.3.2.4. Rata de autodescărcare	129
5.3.2.5. Ciclul de viață	129
5.3.2.6. Capacitate	130
5.3.3. Considerații privind dimensiunea	130
5.3.3.1. Selectarea tensiunii adecvate	130
5.3.3.2. Definiția adâncimii maxime de descărcare	131
5.3.3.3. Considerații suplimentare	131
5.3.4. Exemplu de dimensionare a bateriei	135
5.3.5. Fișa de lucru pentru dimensionarea bateriei	137
5.3.6. Întreținerea bateriei	137
5.3.7. Încărcător flotant	139
5.4. Reglatoare sau controlere de încărcare	141
5.4.1. Puncte de referință pentru reglarea sarcinii	143

5.4.1.1. Reglarea tensiunii	143
5.4.1.2. Histerezis de reglare a tensiunii	143
5.4.2. Puncte de referință pentru reglarea descărcării	143
5.4.2.1. Deconectare de joasă tensiune	143
5.4.2.2. Histerezis de deconectare de joasă tensiune	144
5.4.3. Compensarea temperaturii	144
5.4.4. Controler de încărcare tip șunt	147
5.4.5. Controler de încărcare în serie	148
5.4.6. Controler de modulare a lățimii impulsului	148
5.4.7. Controlerul de urmărire a punctului de putere maximă	149
5.4.7.1. Tehnici frecvent utilizate în MPPT	150
5.4.8. Comparație între controlerul de încărcare PWM și MPPT	152
5.4.9. Controler de încărcare pentru deviere	154
5.4.10. Controler de încărcare pentru sisteme fotovoltaice hibride	154
5.4.11. Dimensionarea controlerului de încărcare	156
5.4.11.1. Dimensionarea controlerului de încărcare PWM	157
5.4.11.2. Dimensiunea controlerului de încărcare MPPT	159
5.5. Invertorul	160
5.5.1. Invertor pe bază de baterie sau în afara rețelei	160
5.5.2. Invertor legat la rețea	162
5.5.3. Dimensionarea invertorului	163
5.6. Echilibrul componentelor sistemului	165
5.6.1. Cablaj	165
5.6.1.1. Ampacitatea	166
5.6.1.2. Tipuri de fire	167
5.6.1.3. Tabelele de dimensionare a firelor - manualul NEC 2020	171
5.6.1.4. Căderea de tensiune	174
5.6.1.5. Exemplu de dimensionare a cablurilor	176
5.6.2. Dispozitive de protecție la supracurent	188
5.6.2.1. Partea de curent continuu	188
5.6.2.2. Partea de curent alternativ	190
5.6.3. Comutatoare	190
5.6.3.1. Efectul temperaturii	191
5.6.3.2. Dimensiunea comutatorului	193
5.6.4. Împământarea	194
5.6.4.1. Importanța împământării	195
5.6.4.2. Tipuri de împământare	195
5.6.4.3. Potențialul pas și potențialul de atingere	196
5.6.4.4. Unele definiții legate de împământare	197
5.6.5. Protecție împotriva trăsnetului	198
5.6.6. Contorizare netă	198
5.6.7. Montarea modului	199
5.6.7.1. Modul solar montat la sol	201
5.6.7.2. Modul solar montat pe stâlp	201
5.6.7.3. Modul solar montat pe acoperiș	202
5.6.8. Sisteme de urmărire solară	203
5.6.9. Răcirea modului fotovoltaic	207
5.7. Concluzie	209
5.8. Exercițiu	209
Bibliografie	211

6. SISTEME FOTOVOLTAICE AUTONOME, HIBRIDE ȘI DISTRIBUITE	216
6.1. Introducere	216
6.2. Sisteme fotovoltaice independente	216
6.2.1. Procesul de dimensionare a sistemului	218
6.2.1.1. Analiza și evaluarea sarcinii	218
6.2.1.2. Determinarea tensiunii sistemului	220
6.2.1.3. Dimensionarea sistemului bateriei	220
6.2.1.4. Evaluarea resurselor solare	222
6.2.1.5. Determinarea dimensiunii matricei fotovoltaice	223
6.2.1.6. Dimensiunea controlerului de încărcare	224
6.2.1.7. Dimensionarea inverterului	224
6.2.2. Studiu de caz: Indonezia	225
6.3. Sisteme fotovoltaice hibride	229
6.3.1. Dimensiunea sistemului	229
6.3.2. Evaluarea amplasamentului	229
6.3.3. Dimensionarea matricei fotovoltaice	230
6.3.4. Dimensiunea băncii de baterii	231
6.3.5. Dimensionarea inverterului	232
6.3.6. Cablaj	233
6.3.6.1. Modul fotovoltaic versus inverter	233
6.3.6.2. Inverter la panoul de distribuție AC	234
6.4. Sisteme solare fotovoltaice distribuite	234
6.4.1. Pomparea apei	235
6.4.1.1. Motor cu inducție pe bază de curent alternativ	236
6.4.1.2. Motor de curent continuu fără perii	238
6.4.1.3. Comparație între motoarele pe bază de curent continuu fără perii și motorul de inducție pe bază de curent alternativ, controlat prin tehnica VFD	239
6.4.1.4. Metodologia de dimensionare a sistemului	240
6.4.1.5. Studii de caz	243
6.4.1.6. Efectul lungimii cablului	254
6.4.2. Sisteme de iluminat stradal	256
6.4.2.1. Studii de caz de proiectare	257
6.4.2.2. Tehnologia bifacială	260
6.4.2.3. Selectarea modului fotovoltaic	261
6.4.2.4. Stocarea energiei	263
6.4.2.5. Rețea avansată	263
6.4.2.6. Convertor	263
6.4.2.7. Durata de viață a proiectului, inflația anuală a deficitului de capacitate și rata de reducere	264
6.4.2.8. Analiza economică și de sensibilitate a studiilor de caz proiectate	266
6.5. Concluzie	266
6.6. Exercițiu	269
Bibliografie	269
7. PROIECTAREA SISTEMELOR FOTOVOLTAICE LEGATE LA REȚEA	271
7.1. Introducere	271
7.2. Tipuri de sisteme conectate la rețea	272
7.3. Studiu de caz: Pepiniera Sierra Cascade, Bonanza, Oregon	272

7.4. Etapele de proiectare a unui sistem fotovoltaic legat la rețea	274
7.4.1. Evaluarea amplasamentului	276
7.4.2. Dimensiunea matricei solare	277
7.4.2.1. Numărul minim de module per șir	278
7.4.2.2. Numărul maxim de module per șir.....	279
7.4.2.3. Numărul de șiruri în paralel	280
7.4.3. Selectarea invertorului și raportul de curent continuu/curent alternativ ..	280
7.5. Analiza tehnico-economică a sistemului legat la rețea	281
7.5.1. Evaluarea amplasamentului	281
7.5.2. Informații despre temperature	283
7.5.3. Module fotovoltaice și distribuție invertoare	284
7.5.4. Protecție la supracurent și întrerupătoare	285
7.5.5. Dimensionarea cablului	285
7.5.5.1. Modul fotovoltaic la invertor	285
7.5.5.2. Invertorul la panoul de distribuție de curent alternativ	286
7.5.6. Împământare	286
7.6. Simularea proiectului folosind sistemul fotovoltaic	287
7.6.1. Diagrame, valori și tabele referitor la sistemul fotovoltaic	287
7.7. Provocările sistemelor fotovoltaice conectate la rețea și posibile soluții	791
7.8. Sisteme fotovoltaice conectate la rețea în țările în curs de dezvoltare: un potențial	296
7.8.1. Bangladesh	297
7.8.1.1. Scenariul actual al sistemului fotovoltaic solar	297
7.8.1.2. Potențialul solar fotovoltaic	297
7.8.2. Siria	298
7.8.2.1. Scenariul actual al sistemului fotovoltaic solar	298
7.8.2.2. Potențialul solar fotovoltaic	299
7.8.3. Comparație cu sistemul solar fotovoltaic din SUA	299
7.9. Rolul sistemului solar fotovoltaic în economia energiei verzi	301
7.10. Concluzie	301
7.11. Exercițiu	302
Bibliografie	302

PREFAȚĂ

Implementarea tot mai mare a sistemelor solare fotovoltaice pe tot globul și viitorul lor promițător au inaugurat o nouă eră în lumea tehnologiilor de energie regenerabilă. Pe măsură ce lumea caută modalități mai curate de a genera energie și renunță la utilizarea combustibililor fosili, se prevede, că sistemele solare fotovoltaice vor fi sursa dominantă de energie în câteva decenii. Conform perspectivelor pieței fotovoltaice din anul 2026 publicate de Allied Market Research, piața fotovoltaică globală valorează 53.916 milioane USD începând din anul 2018 și se așteaptă să ajungă la 333.725 milioane USD în anul 2026. Prin urmare, această tehnologie este foarte promițătoare pentru a asigura o parte majoră a cererilor de energie din întreaga lume. Deci, este esențial ca toată lumea să aibă cunoștințele de bază referitoare la tehnologia fotovoltaică și la aplicațiile sale în diverse domenii.

Sistemele solare fotovoltaice sunt utilizate în mod obișnuit în întreaga lume în clădiri rezidențiale, comerciale și industriale ca instalații pe acoperiș, montate pe stâlpi sau montate la sol. Sunt omniprezente și au aplicații diverse. Datorită omniprezenței sistemelor solare fotovoltaice, autorii s-au simțit impulsionați să scrie o carte despre sistemele fotovoltaice, cu accent pe bazele fundamentale și aplicații.

Această carte este un ghid pentru proiectarea sistemelor solare fotovoltaice practice. Autorii s-au asigurat că simplitatea este menținută pe tot parcursul cărții, astfel încât să ajute pe toată lumea, indiferent de mediul cititorilor. Studenții de inginerie pot folosi cartea ca referință pentru cursuri despre sisteme fotovoltaice, energie regenerabilă sau sisteme de energie electrică. De asemenea, ei pot folosi cartea pentru elaborea proiectelor, precum și pentru cercetări și experimente. Profesorii pot, de asemenea, să utilizeze cartea ca material de curs și să își pregătească schițele de prelegere pe baza acestei cărți. De asemenea, inginerii și proiectanții profesioniști vor găsi această carte generoasă în exemple și perspective practice, care vor ajuta la proiectarea sistemelor fotovoltaice rentabile.

Panourile solare plate bleumarin sau negre sunt mai mult decât simple dispozitive, care absorb lumina. Acestea transformă energia luminoasă a soarelui în energie electrică utilizabilă, care susține nevoile noastre de energie. O matrice solară constă din mai multe module solare, iar fiecare modul este format din mai multe celule solare. Pentru un sistem solar fotovoltaic, pe lângă panoul solar, sunt necesare câteva alte componente pentru a construi un sistem complet de funcționare. Pentru a înțelege cum funcționează un sistem solar fotovoltaic, este necesară o înțelegere de bază a fizicii din spatele principiului de funcționare al celulei solare, împreună cu o

cunoaștere destul de bună despre celelalte componente, cum ar fi bateria, controlerul de încărcare, invertorul, cablarea, dispozitivele de protecție.

Toate aceste subiecte sunt tratate în această carte care descrie pas cu pas proiectul sistemelor fotovoltaice conectate la rețea.

Această carte reprezintă un ghid fundamental pentru tehnologia solară fotovoltaică și este un manual al proiectantului pentru instalarea sistemelor fotovoltaice. Având instrucțiuni detaliate, calcule și ilustrații, această carte oferă cititorului cunoștințele fundamentale despre proiectarea sistemelor fotovoltaice.

Lucrarea este concepută pentru a oferi o abordare practică a cunoștințelor despre sistemele solare fotovoltaice atât pentru studenți, cât și pentru profesioniști. Primele trei capitole prezintă și discută elementele fundamentale ale sistemelor solare fotovoltaice, al patrulea capitol explică evaluarea resurselor solare, al cincilea capitol descrie componentele utilizate într-un sistem solar fotovoltaic și, în final, al șaselea și al șaptelea capitol oferă proiectarea detaliată, proceduri și studii de caz ale instalațiilor practice de sisteme solare fotovoltaice.

Caracteristicile cheie ale acestei cărți

- Prezentare ușor de citit, clară și concisă a tuturor subiectelor de bază din domeniul tehnologiei solare fotovoltaice
- Studii de caz practice pentru a ajuta cu scopul înțelegerii conceptelor dintr-o abordare realistă
- Aplicații ale sistemului fotovoltaic în diferite scopuri
- Elaborarea de concepte conexe precum stocarea energiei bateriei, invertoare, controlere de încărcare, integrare în rețea, etc.
- Ilustrații și imagini reale ale sistemelor fotovoltaice

Wilsonville, OR, SUA
Klamath Falls, OR, SUA

Yaman Abou Jieb
Eklas Hossain

Septembrie 2021

1. PREZENTARE GENERALĂ A INDUSTRIEI SOLARE FOTOVOLTAICE

1.1. Apariția resurselor de energie regenerabilă

Sursele convenționale de energie sunt combustibilii fosili, spre exemplu gazul natural, petrolul și cărbunele, reprezentând resursele energetice dominante în industria globală de producere a energiei electrice încă de la revoluția industrială. Cu toate acestea, nimeni nu se gândise serios la alte resurse datorită abundenței și prețurilor mici.

Criza petrolului a fost percepută pentru prima dată în anul 1973 de Organizația Țărilor Exportatoare de Petrol (OPEC) pentru a reduce producția și a crește prețul. Rezultatul direct al acestei crize a fost o creștere drastică a prețului petrolului cu 400% (de la 3 USD/baril până la 12 USD/baril). Mai mult, criza a arătat lumii necesitatea de a găsi o sursă de energie neepuizabilă și locală. În plus, emisiile de la arderea fosilelor combustibili și impactul negativ, care rezultă asupra mediului și asupra climei, au îndemnat responsabilii să aibă în vedere utilizarea surselor de energie mai curate. De atunci, industria energiei regenerabile (ER) a început să beneficieze de fonduri și sprijin guvernamental, în special energia solară, care este considerată una dintre cele mai favorabile resurse de energie regenerabilă în afară de energia eoliană. Celelalte forme de energie regenerabilă sunt: energia hidroelectrică, energia geotermală, bioenergia, energia valurilor și a mareelor.

1.2. Tehnologiile energiei solare

Energia ajunsă pe Pământ de la Soare este cunoscută sub numele de energie solară. Energia solară este o sursă vastă și gratuită, care poate satisface cu ușurință cererea globală de energie. Cantitatea de energie din lumina soarelui este de 10.000 de ori mai mare față de cererea globală de energie. Prin urmare, potențialul energiei solare este de neegalat pentru a îndeplini cerințele energetice ale tuturor formelor de viață de pe planeta noastră. Trei tehnologii principale sunt utilizate pentru a beneficia de energia de la Soare, încălzirea și răcirea solară (SHC), energia solară concentrată (CSP) și instalații solare fotovoltaice (FV). Iradierea solară constă în principal din energie termică (radiație infraroșie (IR)), urmată de energie luminoasă și radiație ultravioletă (UV). Toate părțile spectrului solar pot fi utilizate pentru a obține energie utilizabilă. Următoarele trei tehnologii utilizează diferite părți ale spectrului solar pentru a produce energie utilizabilă.

Fig. 1.7 arată variația referitoare la energia solară fotovoltaică și la energia eoliană de pe uscat în perioada 2010-2050. În cele mai multe cazuri, valorile pentru instalațiile solare fotovoltaice sunt superioare. Predicțiile pentru anul 2030 arată că pentru instalațiile solare fotovoltaice se vor înregistra valori în intervalul 0,02–0,08 \$/kWh, iar pentru energia eoliană terestră în intervalul 0,03–0,05 \$/kWh. Ambele sunt considerate mai eficiente față de combustibilii fosili, al căror preț va rămâne mai mult sau mai puțin constant.

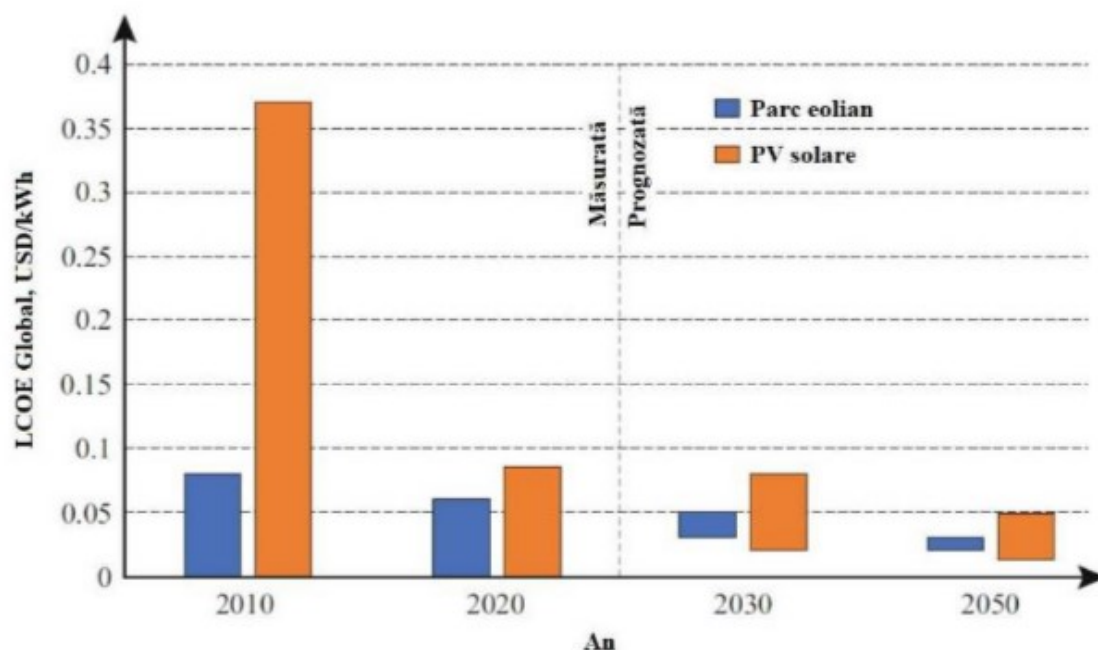


Fig. 1.7. Scăderea costului global al energiei electrice (LCOE) în USD per kWh pentru energia solară fotovoltaică și energia eoliană onshore, conectată la rețeaua de utilități

Alte predicții până în 2050 spun că LCOE al PV solar va atinge 0,014–0,05 \$/kWh, pentru energia eoliană onshore valoarea va atinge limita de 0,02–0,03 \$/kWh.

Odată ce instalarea inițială a sistemului este finalizată și costurile de capital sunt achitate, pentru un sistem solar fotovoltaic se aplică taxe minime de întreținere. În plus, prin stimulente guvernamentale, subvenții, sisteme de contorizare netă, sisteme de facturare pe timp de utilizare și alte avantaje, costurile totale pe durata de viață sunt mult mai mici pentru sistemele solare fotovoltaice, în comparație cu sistemele convenționale de generare a energiei.

Pentru a rezuma, costul sistemelor solare fotovoltaice a scăzut semnificativ de-a lungul anilor, având valori mai mici față de combustibilii fosili existenți. În mod similar, costul global al energiei electrice pentru modulele solare a scăzut considerabil și față de cărbune și gaze naturale și chiar în comparație cu alte opțiuni regenerabile, cum ar fi energia eoliană și geotermală.